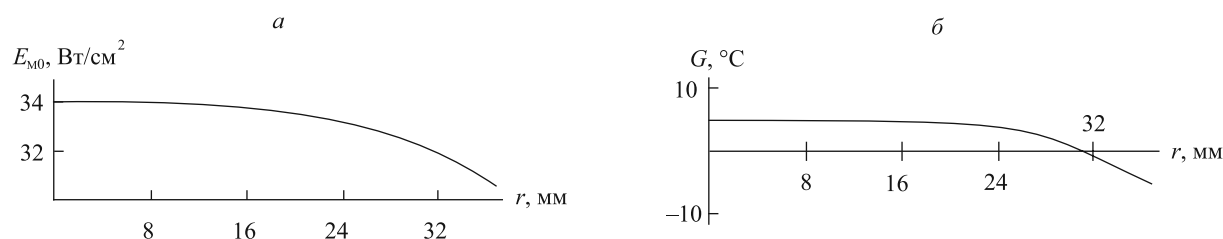


где  $T(t)$  – решение уравнения теплопроводности;  $G(x, y, t)$  – решение уравнения (7).

Уравнение теплопроводности решалось с использованием неявной численной схемы итерационным способом, а для решения (7) использовалась кусочно-постоянная аппроксимация подынтегрального выражения и интегрирование по времени производилось с использованием регуляризации для обхода полюсов<sup>1</sup>. Результаты расчета представлены на рисунке.



Распределение плотности мощности светового потока (а) и отклонение температуры от ее среднего значения (б) по радиусу кремниевой пластины диаметром 76 мм

Таким образом, отклонение температуры от среднего значения не зависит от времени и является одинаковым как в начале, так и в конце БТО световыми импульсами секундной длительности, совпадая с неравномерностью светового потока по площади пластины. Так, при неравномерности светового потока 3 %, что обеспечивается геометрическими размерами камеры, разброс температуры по площади пластины не превышает 0,01 %. При наличии большой неравномерности облучения происходит перераспределение температуры по площади пластины в процессе ее нагрева.

Поступила в редакцию 29.10.2014.

**Валентина Алексеевна Горушко** – ведущий инженер ГЦ «Белмикроанализ» Филиала НТЦ «Белмикросистемы» ОАО «Интеграл» – управляющая компания холдинга «Интеграл».

**Владимир Александрович Пилипенко** – член-корреспондент НАН Беларуси, доктор технических наук, профессор кафедры физики полупроводников и наноэлектроники физического факультета БГУ.

**Владимир Васильевич Понарядов** – кандидат физико-математических наук, доцент, проректор по экономике и инвестициям физического факультета БГУ.

**Татьяна Владимировна Петлицкая** – кандидат технических наук, начальник сектора ГЦ «Белмикроанализ» Филиала НТЦ «Белмикросистемы» ОАО «Интеграл» – управляющая компания холдинга «Интеграл».

**Виталий Александрович Солодуха** – генеральный директор ОАО «Интеграл» – управляющая компания холдинга «Интеграл».

**Сергей Васильевич Шведов** – директор Филиала НТЦ «Белмикросистемы» ОАО «Интеграл» – управляющая компания холдинга «Интеграл».

УДК 621.315.592

П. К. САДОВСКИЙ, А. Р. ЧЕЛЯДИНСКИЙ, В. Б. ОДЖАЕВ, В. В. УГЛОВ,  
П. И. ГАЙДУК, С. Л. ПРОКОПЬЕВ, Д. П. ШЕЙНИКОВ

## ПОШАГОВЫЙ МЕТОД ИМПЛАНТАЦИИ КРЕМНИЯ ИОНАМИ БОРА ПРИ БЫСТРОМ ТЕРМИЧЕСКОМ ОТЖИГЕ

Исследовано образование остаточных протяженных нарушений в кремнии, имплантированном ионами В<sup>+</sup> пошаговым методом, при быстром термическом отжиге (БТО). В отличие от термического отжига в печи при БТО пошаговый метод, совмещенный с эффектом аннигиляции дефектов на примесях замещения (эффект Воткинса), не обеспечивает снижения концентрации остаточных нарушений. Это связывается с высокой мгновенной концентрацией точечных дефектов, образующихся из комплексов радиационных дефектов при БТО. При четырехшаговой имплантации и БТО (1000 °С, 4 · 10 с) диффузионные профили бора совпадают с профилями диффузии при имплантации в один шаг (10 с).

**Ключевые слова:** кремний; бор; пошаговая ионная имплантация; радиационные дефекты; быстрый термический отжиг.

Residual damages in silicon B<sup>+</sup> implanted using the multistep method and rapid thermal annealing (RTA) were studied. Unlike thermal annealing, the multistep method at RTA combined with the effect of defect annihilation on substitutional impurities (Watkins effect) do not provide lowering of the residual damage concentration. This is explained by a high instantaneous concentration of the point defects formed from radiation defect complexes at RTA. For four-step implantation and RTA (1000 °C, 4 · 10 s) the boron diffusion profiles are coincident with diffusion profiles at one-step (10 s) implantation.

**Key words:** silicon; boron; multi-step ion implantation; radiation defects; rapid thermal annealing.

<sup>1</sup> Бахвалов Н. С., Жидков Н. П., Кобельков Г. М. Численные методы. М., 1987.

При ионной имплантации легирующих примесей в кремний образуется большое количество точечных дефектов решетки. Во время термообработки в имплантированных слоях кремния точечные радиационные дефекты трансформируются в протяженные остаточные нарушения типа дефектов упаковки, дислокационные петли. Они вносят глубокие уровни в запрещенную зону кремния и значительно ухудшают параметры полупроводниковых приборов и интегральных схем, а также снижают показатели выхода годных изделий микроэлектроники [1]. Образование остаточных нарушений в кремнии носит пороговый характер, и при пошаговой имплантации бора допороговой дозой ( $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ ) с промежуточными отжигами протяженные нарушения не образуются [2].

Авторами [3] был предложен метод пошагового ионного легирования кремния, в котором для уменьшения числа операций внедрения ионов и промежуточных отжигов эффект пороговой дозы совмещается с эффектом аннигиляции дефектов на примесях замещения при использовании явления Воткинса. Положительный эффект достигался при термических отжиге в печи. В случае перехода к субмикронной технологии необходимость создания тонких ионно-легированных слоев определила широкое использование БТО.

Цель настоящей работы – исследование влияния режимов БТО на образование остаточных нарушений в легированных слоях кремния, созданных пошаговой имплантацией ионов бора. Представляет также интерес изучение профилей диффузии бора при пошаговой имплантации в связи с увеличением общей длительности отжига в сравнении с одношаговой имплантацией.

### Методика эксперимента

Исследованы пластины кремния КЭФ-4,5, имплантированные ионами бора с энергией 80 кэВ дозами  $7 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  и  $1,5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  в один, три и четыре шага. Имплантация выполнена на ускорителе ионов типа «Везувий». Эффективная плотность тока ионов сканирующего пучка в процессе имплантации составляла  $1 \text{ мкА} \cdot \text{см}^{-2}$ , диаметр пучка – 20 мм. После каждого шага имплантации проводился БТО (ламповый отжиг) при  $1000^\circ\text{C}$  в атмосфере  $\text{N}_2$  с различной скоростью набора температуры. Отжиг осуществлялся на установке JetFirst100, температура пластин во время отжига контролировалась оптическим пирометром, направленным на обратную сторону пластины, и записывалась на компьютер. Одна партия образцов отжигалась с планарной стороны, вторая – с обратной.

Структурные исследования легированных слоев выполнены методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) с помощью электронного микроскопа ЭМ-125 при энергии электронов 80 кэВ. Приготовление образцов для исследования проводилось методом химической полировки пластин кремния в растворе кислот  $\text{HF} + \text{HNO}_3$ . Профили примеси бора после БТО определялись методом масс-спектрометрии вторичных ионов (ВИМС) на установке CAMECA IMS4f.

### Результаты эксперимента и их обсуждение

ПЭМ-фотографии образцов кремния, легированного бором дозой  $1,5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  в один шаг и в четыре шага, отожженных БТО при температуре  $1000^\circ\text{C}$  в течение 10 с в атмосфере азота (время набора температуры – 10 с), представлены на рис. 1, а, б. Ламповый отжиг проводился со стороны имплантированного слоя. Из фотографий видно, что как при одношаговой, так и при пошаговой имплантации в легированном слое после отжига наблюдаются остаточные нарушения. В образце видны дислокационные петли и стержнеобразные дефекты, что характерно для БТО с короткими временами отжига.

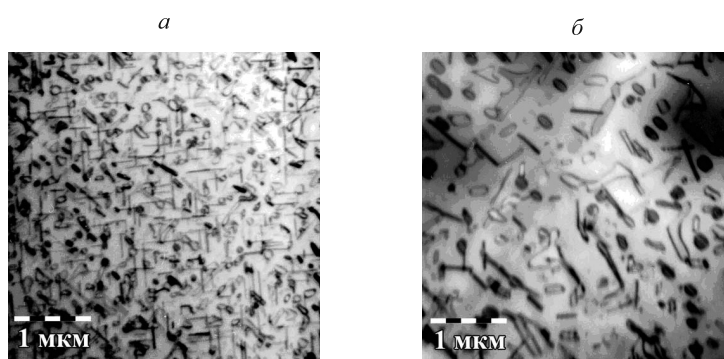


Рис. 1. ПЭМ-микрофотография слоя кремния, легированного бором в один шаг дозой  $1,5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  (а) и в четыре шага дозой  $(1 + 2 + 4 + 8) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  (б). Отжиг БТО в течение 10 с при  $1000^\circ\text{C}$  в  $\text{N}_2$

В отличие от пошаговой имплантации с термоотжигом в печи [3] при промежуточных БТО положительный эффект подавления образования остаточных нарушений не достигается (см. рис. 1, а, б). Можно предположить, что это связано с высоким уровнем ионизации в имплантированном слое в процессе БТО, вследствие чего подавляется эффект Воткинса. При термоотжиге в печи в диапазоне температур 500–600 °С образующиеся при развале междоузельных комплексов атомы кремния, являющиеся источником остаточных дефектов, расходятся на вытеснение атомов бора из узлов вследствие эффекта Воткинса [3], чего, видимо, не происходит при БТО.

Влияние уровня ионизации в слое внедрения на эффективность процесса замещения по Воткинсу подтверждается исследованиями электрической активации имплантированного бора в процессе изохронного отжига [4]. Характерная стадия «обратного» отжига на кривой активации примеси в температурном интервале 500–600 °С, обусловленная вытеснением бора из узлов решетки междоузельными атомами Si, образующимися при развале комплексов Si – B<sub>3</sub>, отсутствует в случае подсветки имплантированного слоя электронами с энергией 10 кэВ при плотности тока электронов 5 мкА · см<sup>-2</sup> [4]. При таком облучении электронами дефекты структуры в кремнии не создаются, повышается лишь уровень ионизации в слое. Для уменьшения уровня ионизации в слое при БТО в процессе отжига была создана «полка» длительностью 20 с при  $T = 500$  °С (развал междоузельных комплексов), а также увеличено время набора конечной температуры отжига  $T = 1000$  °С с 10 до 30 с.

ПЭМ-фотографии образцов кремния, легированного бором дозой  $7 \cdot 10^{14}$  см<sup>-2</sup> в один шаг и в три шага, отожженных при температуре 1000 °С в течение 10 с в атмосфере азота (время набора температуры отжига – 10 и 30 с), представлены на рис. 2. Положительный эффект пошаговой имплантации, заключающийся в уменьшении плотности остаточных нарушений по сравнению со слоями, имплантированными в один шаг, очень незначителен. Полного подавления образования остаточных нарушений, как это имеет место в случае термоотжига в печи [3], не наблюдается.

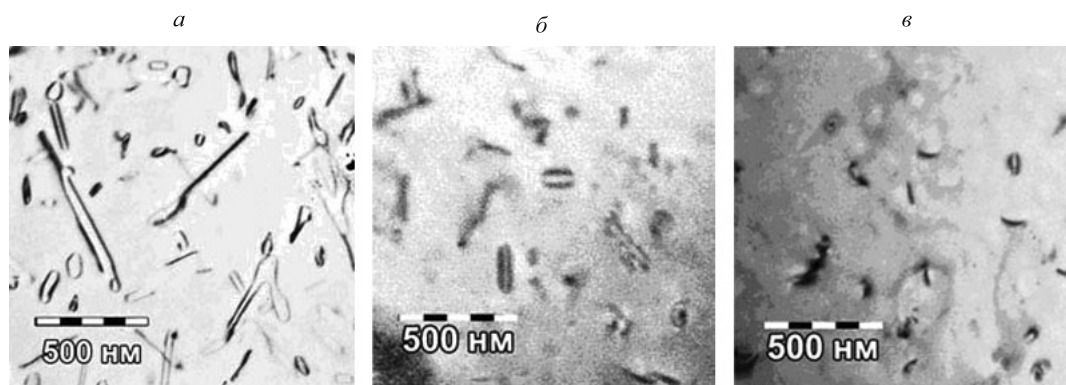


Рис. 2. ПЭМ-микрофотографии слоев кремния, легированных бором:  
а – в один шаг дозой  $7 \cdot 10^{14}$  см<sup>-2</sup>; б, в – в три шага дозой  $(1 + 2 + 4) \cdot 10^{14}$  см<sup>-2</sup>.  
Отжиг БТО в течение 10 с при 1000 °С в N<sub>2</sub>; а, б – время набора температуры 10 с; в – 30 с

При дозе  $1,5 \cdot 10^{15}$  см<sup>-2</sup> плотность дефектов в случае одношаговой имплантации и последующем БТО составила  $1,5 \cdot 10^{10}$  см<sup>-2</sup>, а при имплантации в четыре шага той же дозой  $(1 + 2 + 4 + 8) \cdot 10^{14}$  см<sup>-2</sup> плотность дефектов только в три раза ниже ( $0,6 \cdot 10^{10}$  см<sup>-2</sup>). Аналогичный результат наблюдался и для дозы  $7 \cdot 10^{14}$  см<sup>-2</sup>, с той разницей, что плотности дефектов в данном случае меньше ( $3 \cdot 10^9$  см<sup>-2</sup> и  $1 \cdot 10^9$  см<sup>-2</sup>). Несколько меньшие плотности остаточных нарушений при пошаговой имплантации объясняются только тем, что в этом случае радиационные дефекты не накапливаются в каждом шаге до концентраций, соответствующих одношаговой имплантации.

Данные ПЭМ позволяют сделать вывод о том, что даже при наличии «полки» в случае набора температуры и увеличения времени набора конечной температуры ионизация в слое при БТО остается достаточно высокой, чтобы подавить замещения атомов бора междоузельными атомами кремния вследствие эффекта Воткинса. Следует отметить, что в экспериментах по изучению влияния на процесс замещения уровня ионизации в слое путем облучения низкоэнергетичными электронами с плотностью тока электронов 5 мкА · см<sup>-2</sup> наблюдалось повышение температуры образцов всего с 20 до 40 °С, и в этом случае эффект Воткинса подавлялся [4]. При ламповом же отжиге температуры за счет излучения значительно выше в любом из рассматриваемых случаев, т. е. выше и уровень ионизации в слое.

Таким образом, отсутствие эффекта подавления образования остаточных протяженных нарушений при пошаговой имплантации и БТО вполне можно связать с высоким уровнем ионизации в имплантированном слое [5].

Для исключения влияния уровня ионизации в пошагово имплантированном слое на образование остаточных протяженных нарушений ламповый отжиг проводился с обратной (неимплантированной) стороны пластины. Толщина пластин составляла 400 мкм. Согласно данным [6] длина диффузии неравновесных носителей в кремнии КЭФ-4,5 составляет не более 100–150 мкм, т. е. неравновесные носители не достигают имплантированного слоя. При БТО с обратной стороны пластины кремния, облученного в три шага –  $(1 + 2 + 4) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ , так же как при БТО с планарной стороны, эффект подавления образования остаточных нарушений отсутствует (рис. 3). Следовательно, это не может быть связано с уровнем ионизации в имплантированном слое.

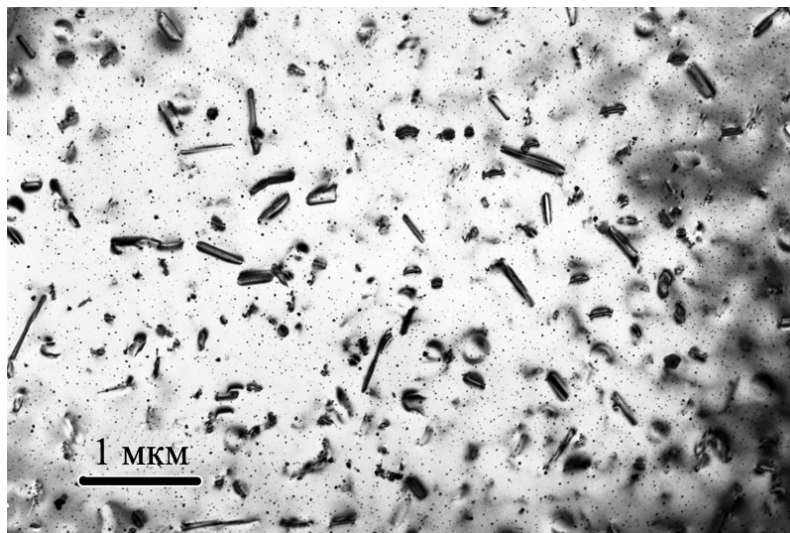


Рис. 3. ПЭМ-микрофотография слоя кремния, легированного бором в три шага дозой  $(1 + 2 + 4) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ . Отжиг БТО с неимплантированной стороны в течение 10 с при 1000 °С в  $\text{N}_2$

Отсутствие положительного эффекта по подавлению образования остаточных нарушений при пошаговой имплантации ионов бора с нарастающей дозой каждого последующего шага можно связать с более высокой мгновенной концентрацией междоузельных атомов кремния в слое внедрения при БТО по сравнению с термоотжигом в печи. При термоотжиге скорость нагрева пластин составляла 5 °С в минуту [3], при ламповом отжиге – около 50 °С в секунду. Поэтому в случае БТО происходит более быстрый распад междоузельных комплексов. Замещение возникающими междоузельными атомами Si атомов В (аннигиляция дефектов) и образование из атомов Si дефектов упаковки и дислокационных петель являются конкурирующими процессами. При БТО в силу более высокой мгновенной концентрации междоузельных атомов Si процесс образования остаточных нарушений эффективнее, чем при термоотжиге в печи с более медленным распадом междоузельных комплексов.

Учитывая то, что при пошаговой имплантации в три или четыре шага суммарное время отжига пластины увеличивается, была исследована диффузия атомов бора при пошаговой имплантации с применением БТО. На рис. 4 представлены профили бора, полученные методом ВИМС, в образцах кремния, имплантированных в один шаг и в четыре шага, после проведения БТО. Как видно из рисунка, профили бора при имплантации в один шаг и в четыре шага практически совпадают, несмотря на различные длительности отжигов.

Результаты можно объяснить, если предположить, что ускоренная диффузия бора протекает по комплексу «междоузельный атом бора – междоузельный атом кремния»  $(\text{B}^i - \text{Si}^i)$  [6]. Для ускоренной диффузии необходим избыток междоузельных атомов кремния. Оценка коэффициента диффузии  $D$  по расчетному исходному и конечному профилям дает значение  $D = 7 \cdot 10^{-12} \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ , в то время как равновесный коэффициент диффузии для данной концентрации бора в кремнии  $D_e = 2 \cdot 10^{-13} \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ .

При пошаговом легировании полная концентрация примеси достигается только на последнем шаге имплантации, а концентрация радиационных дефектов будет ниже, чем при имплантации за один шаг.



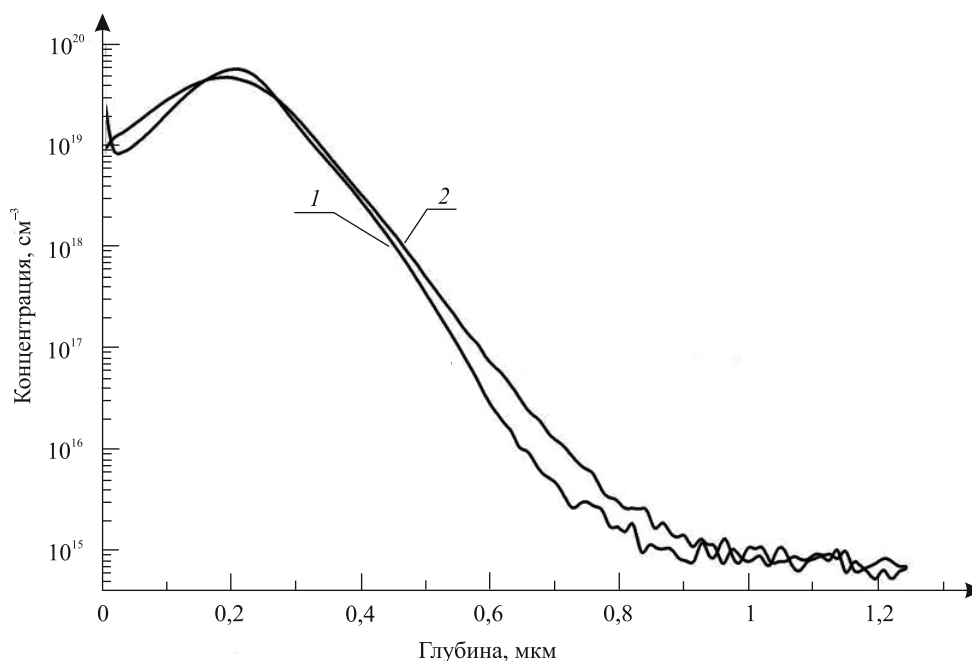


Рис. 4. Профили распределения бора в кремнии после БТО ( $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 10 с).  
Имплантация дозой  $1,5 \cdot 10^{15}\text{ см}^{-2}$  в один шаг (1) и дозой  $(1 + 2 + 4 + 8) \cdot 10^{14}\text{ см}^{-2}$  в четыре шага (2)

В силу этого снижается интенсивность комплексообразования. Меньшее количество образующихся комплексов  $\text{B}^i - \text{Si}^i$ , через которые осуществляется ускоренная диффузия бора в кремнии, компенсирует большее суммарное время диффузии в случае пошаговой имплантации.

Таким образом, при пошаговом методе имплантации кремния ионами бора с нарастающей дозой каждого шага и БТО образование нарушений (дислокационных петель) в легированном слое кремния не подавляется, что объясняется более высокой мгновенной концентрацией междоузельных атомов кремния в слое внедрения при БТО по сравнению с термоотжигом в печи вследствие существенного различия в скоростях нагрева и распада междоузельных комплексов. Также установлено, что при БТО профили диффузии бора при четырехшаговой имплантации практически не отличались от профилей при одношаговой имплантации.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Челядинский А. Р., Комаров Ф. Ф. Дефектно-примесная инженерия в имплантированном кремнии // УФН. 2003. Т. 173, № 8. С. 813.
2. Pre-amorphization damage in ion-implanted silicon / R. J. Schrentelkamp [et al.] // Mater. Sci. Rep. 1991. Vol. 6. P. 275.
3. Создание бездислокационных ионно-легированных слоев кремния / В. И. Плебанович [и др.] // ФТТ. 2008. Т. 50, вып. 8. С. 1378–1382.
4. Jadan M., Chelyadinskii A. R., Yavid V. Yu. Displacement of Boron from the Silicon Crystal Nodes by Interstitial Si Atoms During Implantation and Annealing // American J. Appl. Sciences. 2005. Vol. 2, № 5. P. 910–913.
5. Киреев П. С. Физика полупроводников : учеб. пособие для вузов. М., 1969. С. 472.
6. Diffusion of boron implanted into silicon / V. F. Stelmakh [et al.] // Physica Status Solidi (a). 1985. Vol. 89, № 1. P. 45–49.

Поступила в редакцию 29.10.2014.

**Павел Кириллович Садовский** – младший научный сотрудник кафедры физики полупроводников и нанoeлектроники физического факультета БГУ.

**Алексей Романович Челядинский** – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник кафедры физики полупроводников и нанoeлектроники физического факультета БГУ.

**Владимир Борисович Оджаев** – доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой физики полупроводников и нанoeлектроники физического факультета БГУ.

**Владимир Васильевич Углов** – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физики твердого тела физического факультета БГУ.

**Петр Иванович Гайдук** – доктор физико-математических наук, профессор кафедры физической электроники и нанотехнологий факультета радиофизики и компьютерных технологий БГУ.

**Станислав Леонидович Прокопьев** – младший научный сотрудник кафедры физической электроники и нанотехнологий факультета радиофизики и компьютерных технологий БГУ.

**Дмитрий Петрович Шейников** – начальник производственного участка ОАО «Интеграл» – управляющая компания холдинга «Интеграл».